

# PATENT ABSTRACTS OF JAPAN

(11)Publication number : 2002-043689

(43)Date of publication of application : 08.02.2002

---

(51)Int.Cl. H01S 5/14

---

(21)Application number : 2000-219494 (71)Applicant : NIPPON TELEGR & TELEPH CORP <NTT>

(22)Date of filing : 19.07.2000 (72)Inventor : SATO TOSHIYA  
YAMAMOTO  
FUMIHIKO  
TSUJI YUKITSUGU  
TAKEI HIROKI  
HORIGUCHI  
TSUNEO

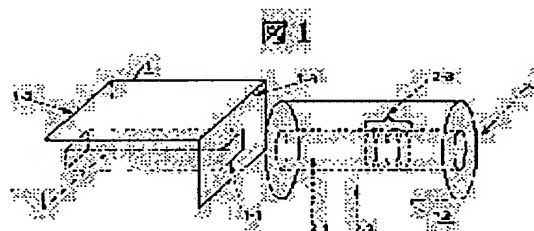
---

## (54) OUTER RESONATOR-TYPE TEMPERATURE NON-CONTROL SEMICONDUCTOR LASER DEVICE

### (57)Abstract:

**PROBLEM TO BE SOLVED:** To provide a temperature non-control semiconductor laser device which is kept stable in oscillation frequency in a wide operating temperature range (50° C or above) that is required for practical use without using a temperature regulating mechanism and also restrained from deteriorating in quality of signal light.

**SOLUTION:** This outer resonator-type semiconductor laser is equipped with a fiber with a diffraction grating, where the reflected spectrum of a diffraction grating is set smaller in width than the oscillation spectrum of a semiconductor amplifying device. The parameters of the diffraction grating or the semiconductor amplifying device are so set as to make a loss difference at light intensity modulation smaller than a



BEST AVAILABLE COPY

loss inversion tolerance between an oscillation longitudinal mode and a non-oscillation longitudinal mode.

---

## LEGAL STATUS

[Date of request for examination] 28.06.2002

[Date of sending the examiner's  
decision of rejection]

[Kind of final disposal of application  
other than the examiner's decision  
of rejection or application  
converted registration]

[Date of final disposal for  
application]

[Patent number]

[Date of registration]

[Number of appeal against  
examiner's decision of rejection]

[Date of requesting appeal against  
examiner's decision of rejection]

[Date of extinction of right]

Copyright (C); 1998,2003 Japan Patent Office

(19) 日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号

特開2002-43689

(P2002-43689A)

(43) 公開日 平成14年2月8日 (2002.2.8)

(51) Int.Cl.<sup>7</sup>

H 0 1 S 5/14

識別記号

F I

H 0 1 S 5/14

データベース (参考)

5 F 0 7 3

審査請求 未請求 請求項の数 6 O L (全 14 頁)

(21) 出願番号 特願2000-219494 (P2000-219494)

(22) 出願日 平成12年7月19日 (2000.7.19)

(71) 出願人 000004226

日本電信電話株式会社

東京都千代田区大手町二丁目3番1号

(72) 発明者 佐藤 俊哉

東京都千代田区大手町二丁目3番1号 日

本電信電話株式会社内

(72) 発明者 山本 文彦

東京都千代田区大手町二丁目3番1号 日

本電信電話株式会社内

(74) 代理人 100083552

弁理士 秋田 収喜

最終頁に続く

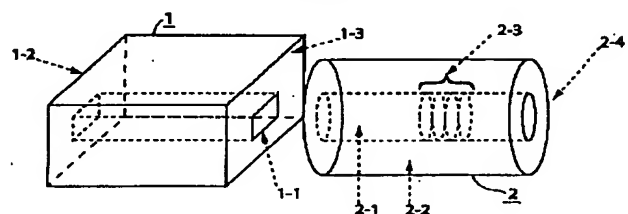
(54) 【発明の名称】 外部共振器型無温度調整半導体レーザー装置

(57) 【要約】 (修正有)

【課題】 温度調整機構を使用せずに、実用上要求される (50℃程度以上の) 広い動作温度範囲での発振波長安定化と、信号光品質の劣化の抑制との両方を同時に実現可能な無温度調整半導体レーザー装置を得る。

【解決手段】 回折格子付きファイバを用いた外部共振器型半導体レーザーにおいて、回折格子の反射スペクトル巾を半導体増幅素子の発振スペクトル巾より小さくし、光強度変調時の損失差を、発振縦モードと非発振縦モード間の損失逆転許容量より小さくするように、前記回折格子と半導体増幅素子のパラメータを設定する。

図 1



## 【特許請求の範囲】

【請求項1】 光増幅媒質として働く半導体光増幅素子（以下、SOAと称する）の活性層と該活性層の光導波方向において交わる一方の端面M1と、前記SOAの活性層と前記活性層の光導波方向において交わる端面で、前記端面M1とは異なるもう一方の端面M2において、前記SOAの活性層光導波路部と光学的に結合した光導波路のコア部に形成したブラッグ回折格子（以下、BGと称する）による光反射部M3とにより光共振器を形成する外部共振器型半導体レーザー（ECDL）において、レーザー発振に関与する波長帯域を制限する前記BGの反射スペクトル帯域幅 $R_{BW}$ と、前記SOAの材料に主に依存して決まる非線形利得飽和の効果の及ぶ波長幅 $dW_{SHB}$ との間で、

$$R_{BW} < dW_{SHB}$$

を満足し、且つ前記BGの反射スペクトル $R(\lambda)$ と、前記ECDLの縦モード波長間隔 $S_{LM}$ と、注入電流量変調によるPCM直接光強度変調（以下、PCM<sub>M</sub>と称する）における、前記SOAの屈折率変動 $dn$ による光共振器実効長の変動量 $dL_{eff\_n}$ 、並びに前記SOAの熱変動に伴い発生する、前記SOAの共振器方向の熱伸縮 $dL$ による光共振器実効長の変動量 $dL_{eff\_T}$ の総量である前記光共振器の光共振器実効長の変動量 $dL_{eff}$ とに依存して決まる、前記BGの反射ピーク波長を挟むかたちで互いに隣接して位置する2つの縦モードの前記BGにより被るdB単位の損失 $Loss_{LM1}$ と $Loss_{LM2}$ の差分が、前記PCM<sub>M</sub>に伴い $-Loss_{AMP\_B}$ から $+Loss_{AMP\_B}$ まで変動する状態における前記損失の差の振幅 $Loss_{AMP\_B}(R(\lambda), S_{LM}, dL_{eff})$ と、使用される前記SOAのキャリアのバンド内電子緩和時間 $\tau_{in}$ に代表される物理的特性と、前記PCM<sub>M</sub>時で光パワーが最低レベルとなっている際の前記SOAの活性層内の光子数 $S_{in\_I}$ 、前記ECDLの実効的光共振器長 $L_{ca}$ とに依存して決まる、前記PCM<sub>M</sub>時の光パワーが最小となっている状態において、既に発振状態にある縦モードが前記BGにより被るdB単位の損失量 $Loss_{LL}$ から発振状態にない他縦モードのうち前記BGにより被る損失量が最も小さい縦モードの、前記BGにより被るdB単位の損失量 $Loss_{NL}$ を引いた差分が、既に発振状態にある縦モードでの単一モードレーザー発振を維持しながらとり得る最大の正の値、すなわち損失逆転許容量 $dLoss(\tau_{in}, S_{in\_I}, L_{ca})$ との間で、 $dLoss(\tau_{in}, S_{in\_I}, L_{ca}) > Loss_{AMP\_B}(R(\lambda), S_{LM}, dL_{eff})$ を満足するように、前記SOAのパラメータ $\tau_{in}$ 、 $dW_{SHB}$ 、 $dL_{eff}$ 、前記ECDLのパラメータ $S_{LM}$ 、 $L_{ca}$ 、前記BGのパラメータ $R(\lambda)$ 、前記SOAの特性、及び前記ECDLの駆動状態によって決まるパラメータ $S_{i$

$n\_I$ 、前記BGの特性、及びECDLの駆動状態によって決まるパラメータ $R_{BW}$ を設定していることを特徴とする外部共振器型半導体レーザー装置。

【請求項2】 前記BGの反射ピーク波長を $\lambda_p$ とし、 $n=1$ 或いは $n=2$ として、前記BGのリニアスケールでの反射スペクトル $R(\lambda)$ が、 $dLoss(\tau_{in}, S_{in\_I}, L_{ca}) < 10 \log_{10}(R(\lambda_p + n \times S_{LM})) - 10 \log_{10}(R(\lambda_p))$ を満足することを特徴とする請求項1に記載の外部共振器型無温調半導体レーザー装置。

【請求項3】 光共振器鏡を構成する端面M1または光反射部M3の何れかの外部光出力に用いる側の光共振器鏡 $M_{out}$ 側において、前記光共振器鏡 $M_{out}$ と光外部光出力ポートとの間に、前記光共振器鏡 $M_{out}$ から光外部光出力ポートへ向かう方向に伝搬する光のみを透過させるように光アイソレータを配置したことを特徴とする請求項1又は2に記載の外部共振器型無温調半導体レーザー装置。

【請求項4】 前記BGが光ファイバのコア部に形成されているか、或いは平面光導波路のコア部に形成されていることを特徴とする請求項1乃至3のうちいずれか1項に記載の外部共振器型無温調半導体レーザー装置。

【請求項5】 前記BGが平面光導波路のコア部に形成されている温度無依存型のBGであることを特徴とする請求項1乃至4のうちいずれか1項に記載の外部共振器型無温調半導体レーザー装置。

【請求項6】 前記端面M2に無反射コート（ARコート）を施すか、或いは活性層の光導波路方向に対する端面M2の角度を垂直に交わる配置から6～9度傾けるか、或いはその両方を施すことを特徴とする請求項1乃至5のうちいずれか1項に記載の外部共振器型無温調半導体レーザー装置。

## 【発明の詳細な説明】

## 【0001】

【発明の属する技術分野】本発明は、光通信用半導体レーザー装置に関し、特に、波長多重（WDM）光伝送システムに用いられる半導体レーザー光源に適用して有効な技術に関するものである。

## 【0002】

【従来の技術】従来、波長多重（WDM）光伝送システムに用いられる半導体レーザー光源としては、温度調整を行うことにより発振波長を安定化させた反射帰還型半導体レーザーダイオード（DFBLD）が一般的に良く用いられている。

【0003】前記DFBLDをWDMシステム用光源として用いる場合、温度調整を全く行わないと仮定すると、例えば、動作保証範囲としてITU（International Telecommunications Union）-T勧告の屋内設備動作保証温度範囲 $-5^{\circ}\text{C} \sim 45^{\circ}\text{C}$ （ITU-T, SG15, Q2/15）を考えた場合、DFBLDの特性として、

温度変化に伴う発振波長変動が $0.1\text{ nm}/^{\circ}\text{C}$ 程度であることから、発振波長変動幅、すなわち各波長チャンネルが占有してしまう波長幅が $5\text{ nm}$ となる。

【0004】このDFBLDの温度特性に起因する各波長チャンネルの占有波長幅は、変調の帯域幅が $10\text{ Gb/s}$ 、 $40\text{ Gb/s}$ において、それぞれおよそ $0.08\text{ nm}$  ( $10\text{ GHz}$ )、 $0.32\text{ nm}$  ( $40\text{ GHz}$ )であることから、原理的に最低限必要とされる占有波長幅の15倍以上もの波長幅を占有してしまうこと、及び光通信で光増幅器としてよく用いられるエルビウムドープ光ファイバ増幅器(EDFA)の光増幅帯域幅が $30\text{ nm}$  (C-band)程度に限られてしまうため、前記光増幅帯域に最大で6チャンネルしか波長チャンネルを配置できないことを考えあわせるとかなり大きな値であると言える。

【0005】すなわち、前記DFBLDは、温度調整による発振波長の安定化を行わないと、WDMシステム用光源としては、波長帯域の使用効率が著しく低い光源である。従って、一般的に前記DFBLDをWDMシステム用光源として用いる場合には、温度調整による発振波長の安定化が行われている。

【0006】しかしながら、温度調整による発振波長の安定化を行うためには、温度測定用のサーミスタ、温度調整用のペルチェ、及びフィードバック回路が必要となり、光源にこれら温度調整用の素子・回路を具備させることにより光源の価格が高価となり、全体の消費電力も増加し、且つ全体として大きくなってしまいう問題があった。

【0007】温度変化による発振波長の変動が小さく抑えられる半導体レーザー光源としては、半導体光増幅素子(SOA)の活性層と前記活性層の光導波方向において交わる2つの端面M1、M2のうち、端面M1を一方の光共振器鏡として用い、端面M2の反射を抑え、前記端面M2側において前記SOAの活性層光導波路部と光学的に結合した光ファイバ或いは平面基盤型光導波路等の光導波路に形成されたブラッグ回折格子(BG)をもう一方の光共振器鏡とする外部共振器型半導体レーザー(ECDL)(参考文献1: R. J. Campbell, et al., Proc. ECOC'95 We. A. 3. 4, pp. 545-548)が挙げられる。

【0008】このECDLにおいては、温度変化による発振波長の変動は、広い温度範囲を総じてみると、前記BGの反射スペクトルの温度変化による変動(大まかに言うと、反射ピーク波長の温度変化による変動)によって決定され、前記BGの反射ピーク波長の温度変化による変動が $0.01\sim 0.02\text{ nm}/^{\circ}\text{C}$ 程度となることから、およそ $-5^{\circ}\text{C}\sim 45^{\circ}\text{C}$ の動作温度範囲においては $1\text{ nm}$ 程度に発振波長変動が抑えられるという特徴を有している。

【0009】しかしながら、温度変化に伴う発振縦モード波長の変動量と、前記BGの温度変化に伴う反射ピー

ク波長の変動に差があるため、ある温度変動周期(およそ $10^{\circ}\text{C}$ 周期)で発振縦モードの跳びが生じ、この発振縦モードの跳びが生じる温度において著しく出力信号光に劣化が生じることが知られている(参考文献2: 高木他、信学技報 OFT98-11, pp. 7-12)。

【0010】従って、温度調整をせずにある温度幅(およそ $10^{\circ}\text{C}$ 程度)以上の温度変動のある環境で使用することはできないため、温度調整を行わない条件の下ではECDLは実用的ではないという問題があった。

【0011】前記ECDLの温度変動時に発生する発振縦モードの跳びを抑えることのできる半導体レーザー光源としては、SOA、BGを形成した平面基盤(PLC)型光導波路、並びに前記SOAと前記BGの間にシリコンを配置した構成で、発振縦モード波長の温度変化と前記BGの反射ピーク波長の温度変化とを同等とすることにより、温度変化によるモードホッピングを起こさないように設計された外部共振器型半導体レーザー(ECDL)が提案されている(参考文献3: T. Tanaka, et al., Electron Lett. pp. 149-150, vol. 35, NO. 2, 1999)。

【0012】

【発明が解決しようとする課題】しかしながら、実現された動作温度範囲は $20^{\circ}\text{C}$ 程度と未だ十分とは言えず、また光共振器内のPLC上に溝を刻みシリコンを挿入する構成であるため、光共振器内の損失の増加が免れないといった問題があった。本発明の目的は、WDM光通信システム用の半導体レーザー光源において、温度調整機構を使用せずに、PCM(Pulse Code Modulation)直接光強度変調(PCM\_M)状態において単一縦モード発振動作をさせつつ、実用上要求される( $50^{\circ}\text{C}$ 程度以上の)広い動作温度範囲での発振波長安定化と、動作温度範囲内のある温度においてPCM\_Mに伴い生じる持続的な発振縦モードの跳びによる、信号光品質の劣化の抑制との両方を同時に実現可能なWDM光通信システム用の無温調半導体レーザー装置を提供することにある。本発明の前記ならびにその他の目的と新規な特徴は、本明細書の記述及び添付図面によって明らかにする。

【0013】

【課題を解決するための手段】本願において開示される発明の概要を簡単に説明すれば、下記のとおりである。

(1) 光増幅媒質として働く半導体光増幅素子(以下、SOAと称する)の活性層と該活性層の光導波方向において交わる一方の端面M1と、前記SOAの活性層と前記活性層の光導波方向において交わる端面で、前記端面M1とは異なるもう一方の端面M2において、前記SOAの活性層光導波路部と光学的に結合した光導波路のコア部に形成したブラッグ回折格子(以下、BGと称する)による光反射部M3とにより光共振器を形成する外部共振器型半導体レーザー(ECDL)において、レーザー発振に関与する波長帯域を制限する前記BGの反射スペクトル帯域幅R<sub>BW</sub>と、前記SOAの材料に主に

依存して決まる非線形利得飽和の効果の及ぶ波長幅  $dW_{SHB}$  との間で、

$$R_{BW} < dW_{SHB}$$

を満足し、且つ前記BGの反射スペクトル  $R(\lambda)$  と、前記ECDLの縦モード波長間隔  $S_{LM}$  と、注入電流量変調によるPCM直接光強度変調（以下、PCM<sub>M</sub>と称する）における、前記SOAの屈折率変動  $dn$  による光共振器実効長の変動量  $dL_{eff,n}$ 、並びに前記SOAの熱変動に伴い発生する、前記SOAの共振器方向の熱伸縮  $dL$  による光共振器実効長の変動量  $dL_{eff,T}$  の総量である前記光共振器の光共振器実効長の変動量  $dL_{eff}$  とに依存して決まる、前記BGの反射ピーク波長を挟むかたちで互いに隣接して位置する2つの縦モードの前記BGにより被るdB単位の損失  $Loss_{LM1}$  と  $Loss_{LM2}$  の差分が、前記PCM<sub>M</sub>に伴い丁度  $-Loss_{AMP\_B}$  から  $+Loss_{AMP\_B}$  まで変動する状態における前記損失の差の振幅  $Loss_{AMP\_B}(R(\lambda), S_{LM}, dL_{eff})$  と、使用される前記SOAのキャリアのバンド内電子緩和時間  $\tau_{in}$  に代表される物理的特性と、前記PCM<sub>M</sub>時で光パワーが最低レベルとなっている際の前記SOAの活性層内の光子数  $S_{in,I}$ 、前記ECDLの実効光共振器長  $L_{ca}$  とに依存して決まる、前記PCM<sub>M</sub>時の光パワーが最小となっている状態において、既に発振状態にある縦モードが前記BGにより被るdB単位の損失量  $Loss_{LL}$  から発振状態にない他縦モードのうち前記BGにより被る損失量が最も小さい縦モードの、前記BGにより被るdB単位の損失量  $Loss_{NL}$  を引いた差分が、既に発振状態にある縦モードでの単一モードレーザ発振を維持しながらとり得る最大の正の値、すなわち損失逆転許容量  $dLoss(\tau_{in}, S_{in,I}, L_{ca})$  との間で、 $dLoss(\tau_{in}, S_{in,I}, L_{ca}) > Loss_{AMP\_B}(R(\lambda), S_{LM}, dL_{eff})$  を満足するように、前記SOAのパラメータ  $\tau_{in}$ 、 $dW_{SHB}$ 、 $dL_{eff}$ 、前記ECDLのパラメータ  $S_{LM}$ 、 $L_{ca}$ 、前記BGのパラメータ  $R(\lambda)$ 、前記SOAの特性、及び前記ECDLの駆動状態によって決まるパラメータ  $S_{in,I}$ 、前記BGの特性、及びECDLの駆動状態によって決まるパラメータ  $R_{BW}$  を設定している外部共振器型半導体レーザ装置である。

【0014】（2）前記手段（1）の外部共振器型無温調半導体レーザ装置において、前記BGの反射ピーク波長を  $\lambda_p$  とし、 $n=1$  或いは  $n=2$  として、前記BGのリニアスケールでの反射スペクトル  $R(\lambda)$  が、 $dLoss(\tau_{in}, S_{in,I}, L_{ca}) < 10 \log_{10}(R(\lambda_p + n \times S_{LM})) - 10 \log_{10}(R(\lambda_p))$  を満足する。

【0015】（3）前記手段（1）又は（2）の外部共振器型無温調半導体レーザ装置において、光共振器鏡

を構成する端面M1または光反射部M3の何れかの外部光出力に用いる側の光共振器鏡M<sub>out</sub>側において、前記光共振器鏡M<sub>out</sub>と光外部光出力ポートとの間に、前記光共振器鏡M<sub>out</sub>から光外部光出力ポートへ向かう方向に伝搬する光のみを透過させるように光アイソレータを配置した。

【0016】（4）前記手段（1）乃至（3）のうちいずれか1つの外部共振器型無温調半導体レーザ装置において、前記BGが光ファイバのコア部に形成されているか、或いは平面光導波路のコア部に形成されている。

【0017】（5）前記手段（1）乃至（4）のうちいずれか1つの外部共振器型無温調半導体レーザ装置において、前記BGが平面光導波路のコア部に形成されている温度無依存型のBGである。

【0018】（6）前記手段（1）乃至（5）のうちいずれか1つの外部共振器型無温調半導体レーザ装置において、前記端面M2に無反射コート（ARコート）を施すか、或いは活性層の光導波路方向に対する端面M2の角度を垂直に交わる配置から6～9度傾けるか、或いはその両方を施す。

【0019】すなわち、本発明のポイントは、光増幅媒質として働く半導体光増幅素子（以下、SOAと称する）の活性層と該活性層の光導波方向において交わる一方の端面M1と、前記SOAの活性層と前記活性層の光導波方向において交わる端面で、前記端面M1とは異なるもう一方の端面M2において、前記SOAの活性層光導波路部と光学的に結合した光導波路のコア部に形成したブラッグ回折格子（以下、BGと称する）による光反射部M3とにより光共振器を形成する外部共振器型半導体レーザ（ECDL）、及びそのECDLのPCM直接変調駆動法において、前記ブラッグ回折格子（BG）または温度無依存化を図ったBGを一方の光共振器鏡として用いる構成の外部共振器型半導体レーザ（ECDL）において、前記BGの反射スペクトル帯域幅  $R_{BW}$  と、前記ECDLに光増幅媒質として使用されるSOAの材料に主に依存して決まる非線形利得飽和の効果の及ぶ波長幅  $dW_{SHB}$  との間で数1の式を満足できるように設定することにより、

【0020】

$$【数1】 R_{BW} < dW_{SHB}$$

非線形利得飽和効果の及ぶ波長領域外の縦モードの発振を前記BGの損失の効果で抑制し、同時に、非線形利得飽和効果の及ぶ波長領域内の縦モードに関しては、前記BGの損失の効果及び非線形利得飽和効果の両方の効果で、前記波長領域内の何れか1つの発振縦モード以外の縦モードの発振を抑制し、総じて単一モード発振状態となるようにし、且つ前記BGの反射スペクトル  $R(\lambda)$  と、前記ECDLの縦モード波長間隔  $S_{LM}$  と、注入電流量変調によるPCM直接光強度変調（PCM<sub>M</sub>）における、前記SOAの屈折率変動  $dn$  による光共振器

突効長の変動量  $dL_{eff\_n}$ 、及び前記SOAの熱変動に伴い発生する、前記SOAの共振器方向の熱伸縮  $dL$  による、光共振器突効長の変動量  $dL_{eff\_T}$  の総量であるところの、前記光共振器の光共振器突効長の変動量  $dL_{eff}$  とに依存して決まるところの、前記BGの反射ピーク波長を挟むかたちで互いに隣接して位置する2つの縦モードの、前記BGにより被るdB単位の損失  $Loss_{LM1}$  と  $Loss_{LM2}$  の差分  $Loss_{LM1} - Loss_{LM2}$  が、前記PCM\_Mに伴い温度  $-Loss_{AMP\_B}$  から  $+Loss_{AMP\_B}$  まで変動する状態における前記損失の差の振幅  $Loss_{AMP\_B}(R(\lambda), S_{LM}, dL_{eff})$  と、使用されるSOAのキャリアのバンド内電子緩和時間  $\tau_{in}$  に代表される物理的特性と、前記PCM\_M時で光パワーが最小となっている際の光共振器内光子数  $S_{in\_I}$  と、前記ECDLの実効的光共振器長  $L_{ca}$  とに依存して決まるところの、前記PCM\_M時の光パワーが最小となっている状態において、既に発振状態にある縦モードが、前記BGにより被るdB単位の損失量  $Loss_{LL}$  から、発振状態にない他縦モードのうち前記BGにより被る損失量が最も小さい縦モードの前記BGにより被るdB単位の損失量  $Loss_{NL}$  を引いた差分  $Loss_{LL} - Loss_{NL}$  が、既に発振状態にある縦モードでの単一モードレーザー発振を維持しながらとり得る最大の正の値、すなわち損失逆転許容量  $dLoss(\tau_{in}, S_{in\_I}, L_{ca})$  との間で、数2の式を満足できるように設定することにより、PCM\_NPS (Networ Packet Switching) に、ある温度周期で現れる発振縦モードが持続的に跳ぶ状態、すなわちモードホッピング状態に陥ることによる出力信号光の品質劣化を抑制し、且つ数3の式を満足する特性を有することにより、発振縦モード波長が前記BGの反射ピーク波長から  $n \times$  縦モード波長間隔分離した時点で、前記BGの反射ピーク波長により近い縦モードでの発振に切り替わるようにして、この結果として発振波長を前記BGまたは温度無依存化を図った前記BGの反射ピーク波長の温度に対する変動幅と  $n \times$  縦モード波長間隔の和程度の波長幅にまで温度に対して安定化させることである。

【0021】

【数2】  $dLoss(\tau_{in}, S_{in\_I}, L_{ca}) > Loss_{AMP\_B}(R(\lambda), S_{LM}, dL_{eff})$

【0022】

【数3】  $dLoss(\tau_{in}, S_{in\_I}, L_{ca}) < 10 \log_{10}(R(\lambda_p + n \times S_{LM})) - 10 \log_{10}(R(\lambda_p))$

前記本発明の手段によれば、温度調整機構を使用せずに、PCM\_M状態において単一縦モード発振動作をさせながら、実用上要求される(50℃程度以上の)広い動作温度範囲での発振波長安定化と、動作温度範囲内の

ある温度においてPCM\_Mに伴い生じる、持続的な発振縦モードの跳びによる、信号光品質の劣化の抑制との両方を同時に実現することができる。

【0023】以下に、本発明について、本発明による実施形態(実施例)とともに図面を参照して詳細に説明する。前記実施形態を説明する全図において、同一機能を有するものは同一符号を付け、その繰り返しの説明は省略する。

【0024】

【発明の実施の形態】図1は、本発明の無温調半導体レーザー装置の基本となるBGミラーを用いた実施形態1のECDLの構成を示す斜視図であり、図2は、PLC型光導波路に形成させたBGを一方の光共振器鏡として用いる構成の実施形態2のECDLを示す斜視図である。

【0025】図1において、1はSOA、1-1は活性層光導波路部、1-2は活性層光導波路部の光導波方向に面した端面M1、1-3は活性層光導波路部の光導波方向に面した端面M2、2は光ファイバ、2-1はコア、2-2はクラッド、2-3はBG形成部、2-4は外部光出力ポートである。

【0026】光ファイバ2に光学的に結合される側の端面(M2)1-3は、ARコートが施されるか、或いは活性層光導波路部1-1の光導波方向との角度を垂直な状態から6~9度程度傾けるか、或いはその両方を施している。このように構成することにより前記端面(M2)1-3での反射が抑えられるようにする。

【0027】前記端面1-2が、本実施形態1のECDLの一方の光共振器鏡M1として、また、光ファイバ2に形成した前記BG2-3が、前記ECDLのもう一方の光共振器鏡M3として働く。前記光ファイバ2に形成された前記BG2-3は、SOA1の光増幅波長帯域に比べ狭い反射スペクトル特性を有し、前記BG2-3の反射波長帯域からはずれた波長域での前記ECDLの光共振器内で駆動時に被る実効的光利得を効果的に抑え、前記ECDLの発振波長をBG2-3の反射波長帯域内に制限する働きをする。

【0028】図2において、3はPLC型光導波路、3-1は光導波路部、3-2はBG形成部、3-3は外部光出力ポートである。前記PLC型光導波路3に光学的に結合される側の端面(M2)1-3は、ARコートが施されるか、或いは活性層光導波路部1-1の光導波方向との角度を6~9度程度傾けるか、或いはその両方を施している。このように構成することにより前記端面(M2)1-3での反射が抑えられるようにする。

【0029】端面(M1)1-2が、本実施形態2のECDLの一方の光共振器鏡M1として、また、PLC型光導波路3に形成したBG形成部3-2が、本実施形態2のECDLのもう一方の光共振器鏡M3として働く。

【0030】前記PLC型光導波路3に形成されたBG

形成部3-2は、前記SOA1の光増幅波長帯域に比べ狭い反射スペクトル特性を有し、前記BG形成部3-2の反射波長帯域からはずれた波長域での前記ECDLの光共振器内で駆動時に被る実効的光利得を効果的に抑え、前記ECDLの発振波長を前記BG形成部3-2の反射波長帯域内に制限する働きをする。

【0031】ここで、光ファイバ2に形成されたBG形成部3-2、PLC型(Si系平面基盤型)光導波路3に形成されたBG形成部3-2の反射ピーク波長の温度依存性は $0.01 \sim 0.02 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ 程度(参考文献4: 指宿他、信学技報 OFT98-10, pp. 1-6、参考文献5: Y. Hibino, et al., Proc ECOC'99, PD1-5, pp. 10-11)であることから、前記BGの反射スペクトルが前記ECDLの縦モード間隔に対して十分に狭いものと仮定し、動作温度範囲を $-5^\circ\text{C} \sim 45^\circ\text{C}$ の $50^\circ\text{C}$ の範囲と仮定すると、前記ECDLの発振波長の動作温度範囲における変動幅は $0.02 \text{ nm}/^\circ\text{C} \times 50^\circ\text{C} = 1 \text{ nm}$ 程度に抑えられる。

【0032】しかしながら、温度変化に伴う前記BGの反射ピーク波長の変動と、温度変化に伴う前記ECDLの縦モードの変動に差があるため、光共振器長の実効長がおおよそ6mm程度、縦モード間隔がおおよそ0.15nm程度である場合、動作温度幅より短い $10^\circ\text{C}$ 程度の温度周期で現れる、ある温度で、前記PCM\_Mの際の前記SOA1への注入電流変化に伴う熱的な変動、キャリア密度の変動により誘起される光共振器実効長変動、すなわち発振縦モード波長の変動により、光共振器内の損失が最小となる最適な発振条件を満たす縦モードが、頻繁に切り替わり、結果として発振縦モードが頻繁に切り替わってしまう状況、いわゆるモードホッピング状態に陥ることとなり、このようなモードホッピングが原因で、前記ECDLからのPCM\_M出力信号光の品質が著しく劣化してしまうことが広く知られている(前記参考文献2)。

【0033】以下に、本発明の無温調半導体レーザー装置の基本的な原理の理解を助けるために、先ず、レーザーの発振モードが跳ぶという現象の説明を行い、引き続き、本発明の基本的な原理を説明する。

【0034】レーザーの発振縦モードが跳ぶという現象は、通常の、高速の光通信に用いられるECDLのように、単一モード発振動作とすることを目的に、縦モード波長間隔に比べ外部共振器鏡の反射帯域の波長幅が十二分に狭くなるよう設計されているECDLにおいては、以下のように理解される。

【0035】(従来型ECDLにおけるレーザーの発振モードが跳ぶという現象の説明) レーザー発振開始当初は、前記SOA1の利得から光共振器内部の損失を引いた差分の最も大きな縦モードが、特に、前記SOA1の利得が一様と見なせる波長範囲に限定できる場合には光共振器内部の損失の最も小さな縦モードLM2(図3の5-2)が、発振に最適な縦モードであり、この最適縦

モードでレーザー発振を開始する(図3)。

【0036】レーザー発振を開始した後、何らかの要因により光共振器内部の損失の波長特性が変化するか、或いは縦モード波長が変動することにより、各々の縦モードの被る損失が変化することにより、発振縦モードと、発振縦モード以外の縦モードの被る損失が逆転した場合(図4)、発振縦モードが切り替わり、光共振器内部で被る損失が最小の縦モードLM1(図4の5-1)でレーザー発振する。

【0037】従って、従来のECDLを用いた場合、温度等の条件により、発振に最適な波長領域に存在し、互いに隣接する2つの縦モードのBGにより被る損失が拮抗するような状態となり、特に、PCM\_Mに伴いBGの中心波長に対する縦モードLM1(図5の5-1)、LM2(図5の5-2)の波長位置関係が、ハイレベル信号光出力時においては5-1-H、5-2-H、(図5)に示すような位置関係となることによりBGにより被る損失が縦モードLM2において最も小さくなり、ローレベル信号光出力時に於いては5-1-L、5-2-L(図5)に示すような位置関係となることによりBGにより被る損失が縦モードLM1において、最も小さくなるような状態(図5)に陥ると、ハイレベル信号光出力時には縦モードLM2でレーザー発振し、ローレベル信号光出力時には縦モードLM1でレーザー発振する。

【0038】すなわちPCM\_Mに追随するかたちで前記2つの縦モードLM1、LM2が、交互に発振縦モードとなる、いわゆるモードホッピング状態となる。

【0039】しかしながら、光通信用に用いられている半導体レーザーにおいては、キャリアのバンド内電子緩和時間が $0.7 \sim 2.0 \times 10^{-13} \text{ s}$ 程度(参考文献6: M. Asada, et al., IEEE J. Quantum Electron, QE-21, 5, pp. 434-442, 1985)と比較的ゆっくりとしているため、非線形利得飽和が誘起され、発振縦モード以外の縦モードが被る利得が発振縦モードの光共振器内の光強度に比例して抑圧を受け、結果として発振縦モード以外の縦モードの利得が、しきい値利得以下に保持されその発振が抑制される現象が起こることが報告されている(参考文献7: M. Nakamura, et al., J. Appl. Phys. 49(9), pp. 4644-4648, 1978)。

【0040】このような、非線形利得飽和の効果を考慮すると、先に述べたようなSOA1の利得が一様と見なせる波長範囲に限定できる場合においても、先に述べた光共振器内部での損失の大小にのみ関係して発振する縦モードが決まるという説明は破綻する。

【0041】従って厳密にはレーザーの発振縦モードが跳ぶという現象は以下のように説明される。すなわちレーザー発振を開始した後、何らかの要因により光共振器内部の損失の波長特性が変化するか、或いは縦モード波長が変動することにより、各々の縦モードの被る損失が



変化することにより発振縦モードLM1と、発振縦モードとは異なるある縦モードLM2の被る損失が逆転する場合においても、前記損失の逆転量が、非線形利得飽和の効果により生じ、前記縦モードLM1が被る実効的な損失量 $dLoss_{LM1}$ と、非線形利得飽和の効果により生じ、前記縦モードLM2が被る実効的な損失量 $dLoss_{LM2}$ との差分 $dLoss (=dLoss_{LM2}-dLoss_{LM1})$ より大きくなるまで、発振縦モードが当初の発振縦モードLM1のまま保持されて発振し続け、その後、前記非線形利得飽和の効果により生じる実効的な損失量の差分 $dLoss$ より大きな光共振器内損失量の逆転が生じた時点で、発振縦モードが切り替わり、先に発振状態にあった縦モードLM1とは異なる、光共振器内部で被る損失が最小となっていた縦モードLM2でレーザー発振することとなる。

【0042】従来型のECDLにおけるレーザーの発振モードが跳ぶという現象が、前記従来型ECDLにおけるレーザーの発振モードが跳ぶという現象の説明によって十分に説明できるのは、従来型ECDLが、単一モード発振動作とすることを目的に、縦モード波長間隔に比べ、外部共振器鏡の反射帯域の波長幅が十二分に狭くなるよう設計されていることから、レーザー発振の最適波長の最も近傍に位置する2つの縦モードの被る光共振器内部での損失が拮抗するような状況になった場合(図5)、PCM\_Mにより誘起される縦モード波長位置の僅かな変動により生じる損失差の変動量が、前記非線形利得飽和の効果により生じる実効的な損失量の差分、すなわち損失逆転許容量 $dLoss$ に比べて非常に大きくなり、前記 $dLoss$ の量が十分に無視できる状況となっているためであると理解される。

【0043】また、先に記述した従来のECDLのモードホッピング状態に関する説明は、厳密には、温度等の条件により、発振に最適な波長領域に存在し、互いに隣接する2つの縦モードのBGにより被る損失が拮抗するような状態となり、特に、PCM\_Mに伴いBGの中心波長に対する縦モードLM1(図6の5-1)、LM2(図6の5-2)の波長位置関係がハイレベル信号光出力時において5-1-H、5-2-H、(図6)に示す様な位置関係となることにより、BGにより被る損失が縦モードLM2において最も小さくなり、同時にハイレベル信号光出力時における前記損失逆転許容量 $dLoss$ (図6の6-2)よりも前記縦モードLM1、LM2のBGにより被る損失の差分 $dLoss$ (数4)が大きくなり、

【0044】

【数4】 $dLoss = Loss(LM1, 5-1-H) - Loss(LM2, 5-2-H)$

且つローレベル信号光出力時において、5-1-L、5-2-L(図6)に示すような位置関係となることにより、BGにより被る損失が縦モードLM1において最も

小さくなり、同時にローレベル信号光出力時における前記損失逆転許容量 $dLoss$ (図6の6-2)よりも、前記縦モードLM2、LM1のBGにより被る損失の差分 $dLoss(LM2, 5-2-L) - Loss(LM1, 5-1-L)$ が大きくなるような状態(図6)に陥ると、ハイレベル信号光出力時においては縦モードLM2でレーザー発振し、ローレベル信号光出力時には縦モードLM1でレーザー発振する。

【0045】すなわちPCM\_Mに追従するかたちで、前記2つの縦モードLM1、LM2が、交互に発振縦モードとなるいわゆるモードホッピング状態となる、と言うように言い換えられる。

【0046】(本発明の基本的な原理)前記モードホッピング現象時のレーザー発振状態の挙動をふまえ、本発明においては、非線形利得飽和の効果を有効に活用して、モードの持続的な跳びを抑制できるようにする。

【0047】先ず、レーザー発振に関与する波長帯域を制限する前記BGの反射スペクトル帯域幅 $R_{BW}$ と、前記SOAの材料に主に依存して決まる非線形利得飽和の効果の及ぶ波長幅 $dW_{SHB}$ との間で、 $R_{BW} < dW_{SHB}$ を満足できるように設定することにより、非線形利得飽和効果の及ぶ波長領域外の縦モードの発振をBGの損失の効果で抑制し、同時に、非線形利得飽和効果の及ぶ波長領域内の縦モードに関しては、BGの損失の効果及び非線形利得飽和効果の両方の効果で、前記波長領域内の何れか1つの発振縦モード以外の縦モードの発振を抑制し、総じて単一モード発振状態となるようにする。

【0048】更に、前記BGの反射ピーク波長を挟むかたちで互いに隣接して位置する2つの縦モードの前記BGにより被るdB単位の損失 $Loss_{LM1}$ と $Loss_{LM2}$ の差分 $Loss_{LM1} - Loss_{LM2}$ が、前記PCM\_Mに伴い $dLoss_{AMP\_B}$ から $+Loss_{AMP\_B}$ まで変動する状態における前記損失の差の振幅 $Loss_{AMP\_B}$ を決定づける。

【0049】(1)前記ECDLの

(1-1)外部共振器鏡として用いるBGの反射スペクトル $R(\lambda)$ 、

(1-2)光共振器長により決まる縦モード波長間隔 $S_{LM}$ 、

(2)使用するSOAの、前記PCM\_Mによる光共振器方向実効長の変動量 $dL_{eff}$ といったパラメータと、前記PCM\_M時の光パワーが最小となっている状態において、既に発振状態にある縦モードが前記BGにより被るdB単位の損失量 $Loss_{LL}$ から、発振状態にない他縦モードのうち前記BGにより被る損失量が最も小さい縦モードの、前記BGにより被るdB単位の損失量 $Loss_{NL}$ を引いた差分 $Loss_{LL} - Loss_{NL}$ が、既に発振状態にある縦モードでの単一モードレーザー発振を維持しながらとり得る最大の正の

値、すなわち損失逆転許容量  $dLoss$  を決定づける。

【0050】(3) 使用されるSOAのキャリアのバンド内電子緩和時間  $\tau_{in}$  に代表される物理的特性、

(4) 前記PCM\_M時の光パワーが最小となっている状態における前記SOAの活性層内の光子数  $S_{in\_I}$ 、

(5) 実効的光共振器長  $L_{ca}$ 、といったパラメータを、数5の式を満足するように設定する。

【0051】

【数5】  $dLoss(\tau_{in}, S_{in\_I}, L_{ca}) > Loss\_AMP\_B(R(\lambda), S_{LM}, dL_{eff})$  10

前記設定の結果、発振に最適な、すなわち前記BGにより被る損失が最小となる、波長領域に互いに隣接して存在する2つの縦モードLM1、LM2に関して、前記PCM\_Mに追従して発振縦モードがLM1とLM2との間で交互に切り替わる、いわゆるモードホッピング状態に陥ることが抑制される。

【0052】何故ならば、発振縦モードがLM1とLM2との間で交互に切り替わる状態となるためには、前記縦モードLM1、LM2のBGにより被る損失  $Loss\_LM1$ 、 $Loss\_LM2$  の大小関係が、ローレベル信号光出力時、ハイレベル信号光出力時において交互に切り替わる必要と、同時に前記損失の差の絶対値  $|Loss\_LM1 - Loss\_LM2|$  が、ローレベル信号光出力時、ハイレベル信号光出力時の両方において、損失逆転許容量  $dLoss$  より大きくなる必要がある訳であるが、ここで、前記損失の差  $Loss\_LM1 - Loss\_LM2$  がPCM\_Mに伴い丁度  $-Loss\_AMP\_B$  から  $+Loss\_AMP\_B$  まで変動する状態で、前記損失差の絶対値  $|Loss\_LM1 - Loss\_LM2|$  がローレベル信号光出力時において前記損失逆転許容量より小さいとすると(図7参照)、BGのレーザー発振に係のある波長領域の反射スペクトル特性として、反射中心波長から離れるほど反射率の波長に対しての微分値の絶対値が増大すること、及び前記損失逆転許容量が出力信号光パワーの増大に対応して増大する性質を有し、ローレベル信号光出力時における前記損失逆転許容量がハイレベル信号光出力時における前記損失逆転許容量にくらべ小さいことから、BGの反射中心波長と各縦モード波長の相対位置関係が、前記損失の差  $Loss\_LM1 - Loss\_LM2$  がPCM\_Mに伴い丁度  $-Loss\_AMP\_B$  から  $+Loss\_AMP\_B$  まで変動する状態にある時は、ハイレベル信号光出力時、ローレベル信号光出力時の両方において、前記損失差の絶対値  $|Loss\_LM1 - Loss\_LM2|$  が前記損失逆転許容量より小さい状態が保持されるため発振縦モードがLM1とLM2との間で切り替わるということが起こり得ず、また、BGの反射中心波長と各縦モード波長の相対位置が前記損失の差  $Loss\_LM1 - Loss\_LM2$  が、PCM\_Mに伴い丁度  $-Loss\_AMP\_B$  から  $+Loss$  50

$s\_AMP\_B$  まで変動する状態からシフトし、ローレベル信号光出力時の前記損失差の絶対値  $|Loss\_LM1 - Loss\_LM2|$  が僅かでも増大すると、ハイレベル信号光出力時においては、前記損失差の絶対値  $|Loss\_LM1 - Loss\_LM2|$  は逆に減少し、ハイレベル信号光出力時の前記損失逆転許容量より小さい状態が保持されるため、ハイレベル信号光出力時には既に発振状態にある縦モードでの発振が保持され、仮にローレベル信号光出力時の前記損失差の絶対値  $|Loss\_LM1 - Loss\_LM2|$  がローレベル信号光出力時の前記損失逆転許容量より大きくなり、縦モードの切り替わりが起こることが可能な状態となったとしても発振縦モードがLM1とLM2との間で交互に切り替わるということが起こり得ず、またBGの反射中心波長と各縦モード波長の相対位置が前記損失の差  $Loss\_LM1 - Loss\_LM2$  がPCM\_Mに伴い丁度  $-Loss\_AMP\_B$  から  $+Loss\_AMP\_B$  まで変動する状態からシフトし、ハイレベル信号光出力時の前記損失差の絶対値  $|Loss\_LM1 - Loss\_LM2|$  が僅かでも増大すると、ローレベル信号光出力時においては、前記損失差の絶対値  $|Loss\_LM1 - Loss\_LM2|$  は逆に減少し、ローレベル信号光出力時の前記損失逆転許容量より小さい状態が保持されるため、ローレベル信号光出力時には既に発振状態にある縦モードでの発振が保持され、仮にハイレベル信号光出力時の前記損失差の絶対値  $|Loss\_LM1 - Loss\_LM2|$  がハイレベル信号光出力時の前記損失逆転許容量より大きくなり、縦モードの切り替わりが起こることが可能な状態となったとしても発振縦モードがLM1とLM2との間で交互に切り替わるということが起こり得ず、総じて、BGの反射スペクトルに対しての縦モードLM1、LM2の波長位置関係に依らず前記PCM\_Mに追従して、発振縦モードがLM1とLM2との間で交互に切り替わるということが起こり得ないためである。この結果、前記モードホッピング状態により発生する持続的な出力信号光の品質劣化を回避することができる。

【0053】さらに、前記BGの反射スペクトル  $R(\lambda)$  が、反射ピーク波長を  $\lambda_p$  とし、 $n=1$ 、或いは  $n=2$  として、前記数3の式を満足する特性を有するようにすることにより、発振縦モード波長が前記BGの反射ピーク波長から  $n \times$  縦モード波長間隔分離した時点で、前記BGの反射ピーク波長により近い縦モードでの発振に切り替わることとなり、その結果、発振波長をBGまたは温度無依存化を図ったBGの反射ピーク波長の温度に対する変動幅と  $n \times$  縦モード波長間隔の和程度の波長幅にまで温度に対して安定化させることができるようになる。

【0054】次に具体的な数値を入れた例を示す。まず、DFB等の半導体レーザーのPCM\_Mの際の注入電流変化に伴う熱的な変動、及びキャリア密度の変動に

より、誘起される発振縦モード波長の変動量は一般的に高速変調時のキャリア効果による変動が200~300 MHz/mA、低速変調時の熱効果による変動が~10 GHz/mA (参考文献8: S. Kobayashi, et al., IEEE, J. Quantum Electron., QE-18, 4 (1982), pp. 582-595、参考文献9: Y. Kotaki, et al., Proc. OFC'90, THE3, p159, 1990) であることが報告されている。

【0055】ここでは、高速PCM\_M応用を考え、DFB等の半導体レーザーのPCM\_Mの際の注入電流変化に伴う、キャリア密度の変動により誘起される発振縦モード波長の変動量が支配的な領域を考え、一般的なSOAの光共振器方向の長さとして $3.0 \times 10^{-4}$  m程度、屈折率として1.550 nm帯の半導体レーザー用の組成でのInGaAsPで3.5程度と仮定すると、PCM\_M時の単位変調電流量当たりのSOAの光共振器方向の実効長の変動量は、 $3.5 \times 4.66 \times 10^{-10}$  m/mAと見積もられ、PCM\_M時の印加される電流の振幅を50 mAとすると、使用するSOAのPCM直接変調駆動による光共振器方向実効長の変動量 $dL_{eff}$ は、 $3.5 \times 2.33 \times 10^{-8}$  m =  $8.155 \times 10^{-8}$  mと見積もられる。

【0056】前記BGを光共振器鏡として用いる目的で反射率が5~50%程度として設計した場合、反射スペクトルの3 dB帯域程度の波長帯域に限ると前記BGの反射スペクトル $R(\lambda)$ は、以下の数6の式に示すガウス関数でよく近似することが可能である。

【0057】

$$\begin{aligned} \text{【数6】 } R(\lambda) &= R R \exp(-\log 2 (\lambda - \lambda_0)^2 / \\ &L_{oss\_AMP\_B}(R(\lambda), S_{LM}, dL_{eff}) \\ &= L_{oss\_AMP\_B}(R\_FWHM, S_{LM}, dL_{eff}) \\ &= (160 \log 2 / \log 10) (dL_{eff} / \lambda_0) (S_{LM} / (C_W \times \\ &R\_FWHM))^2 \end{aligned}$$

図8に示すa1、a2に前記ECDLの縦モード波長間隔 $S_{LM}$ に対する前記損失の差の振幅 $L_{oss\_AMP\_B}(R\_FWHM, S_{LM}, dL_{eff})$ の数値計算例を示す。

【0063】パラメータとしては、 $\lambda_0 = 1552.52$  nm、 $dL_{eff} = 8.155 \times 10^{-8}$  m、 $R\_FWHM = 0.2$  nm (a1)、 $0.4$  nm (a2)を用い、前記BGのピーク反射率を15%、このときの補正係数を

【0064】以下では、問題とする、発振状態にある縦モードをp、競合する縦モードをqと表記する。これら問題となる2つの縦モードの実効光共振器長が $L_{ca}$ であり、且つ競合縦モードqにおけるBGにより生じる損失 $L_{oss\_q}$ と、発振縦モードpにおけるBGにより生じる損失 $L_{oss\_p}$ との差が、 $dL_{oss\_pq} = L_{oss\_p} - L_{oss\_q}$ で表される場合のしきい値利

$$(C_W \times BG\_FWHM / 2)^2)$$

ここで、RRはピーク反射率、 $\lambda_0$ は反射中心波長、BG\_FWHMは3 dB反射帯域幅、 $C_W$ は補正係数である。ピーク反射率RRが大きくなる程、補正係数 $C_W$ は大きな値となり、且つ十分な近似が可能な帯域幅が狭くなる。

【0058】例えば、ピーク反射率RR=0.5 (50%)において $C_W = 1.1$ という値をとることにより、 $0.7 \times BG\_FWHM$ 程度の反射帯域幅において、数値計算に基づくBGの反射スペクトルと、前記数6の近似式による反射スペクトルの波長に関する微分値に関する誤差を15%未満に抑えることが可能となる。

【0059】このような近似は、レーザー発振に関してその反射スペクトル形状も重要なパラメータとなるのが反射ピーク波長近傍の比較的反射率の高い波長領域のみであることから、以下の議論では十分に妥当と考えられ、さらに、解析的な計算を可能とし、結果として見通しが良くなるので、以下ではこの近似を用いた議論を進める。

【0060】ただし、厳密には数値計算により算出されるBGの反射スペクトルに基づき、同様の計算を数値的に行うことにより前記損失の差の振幅 $L_{oss\_AMP\_B}(R(\lambda), S_{LM}, dL_{eff})$ が求められる。

【0061】いま、前記の近似を用いると、前記損失の差の振幅 $L_{oss\_AMP\_B}(R(\lambda), S_{LM}, dL_{eff})$ は、数7の式で表される。

【0062】

【数7】

得を $G_{th\_p}(dL_{oss\_pq}, L_{ca})$ 、 $G_{th\_q}(0, L_{ca})$ とし、非線形利得飽和効果項を表す3次利得定数を $G_3(\lambda_m, \lambda_n, \tau_{in}, L_{ca})$  (参考文献10: M. Yamada, et al., J. Apply. Phys., 52(4), pp. 2653-2664, 1981) 発振状態にある縦モードpのバイアス電流値 $I_b$ における、前記SOAの活性層内の光子数を $S_{in\_I}(I_b)$ とすると、縦モードqを非線形利得飽和効果により抑圧し、縦モードpで発振し続けるための条件は、数8の式で表すことができる。

【0065】

$$\text{【数8】 } S_{in\_I}(I_b) < \{G_{th\_p}(L_{ca}) - G_{th\_q}(L_{ca})\} / \{G_3(\lambda_p, \lambda_q, \tau_{in}, L_{ca}) - G_3(\lambda_p, \lambda_p, \tau_{in}, L_{ca})\}$$

ここで、光共振器長 $L_{ca}$ に対して、前記数8の式を満足できる最大の $dL_{oss\_pq}$ 、すなわち許容損失逆転量 $dL_{oss}$ を数値的に求めることにより、縦モード波長間隔 $S_{LM}$ に対しての許容損失逆転量 $dL_{oss}$ を求めることができる。

【0066】図8に示すb1、b2に、キャリアのバンド内電子緩和時間 $\tau_{in}$ が $1.0 \times 10^{-13}$  s、PCM\_Mのバイアス電流値 $I_b$ が $I_b = 1.2 I_{th}$  (b1)、 $1.4 I_{th}$  (b2) の場合の数値計算例を示す。ただし、 $I_{th}$ はレーザー発振のしきい値電流であり、この数値計算においては $I_{th} = 12.4$  mAであった。

【0067】図8に示すa1、a2の各々でのR\_FWHMの値0.2 nm、0.4 nmに対しては、 $I_b = 1.2 I_{th}$ においては、各々交点C1-1、C1-2での縦モード波長間隔0.053 nm、0.084 nmよりもそれぞれ狭い縦モード波長間隔を選ぶことにより、 $I_b = 1.4 I_{th}$ においては、各々交点C2-1、C2-2での縦モード波長間隔0.066 nm、0.105 nmよりもそれぞれ狭い縦モード波長間隔を選ぶことにより、数9の式が満足されることとなる。

【0068】

【数9】  $dLoss(\tau_{in}, S_{inI}, L_{ca}) > Loss\_AMP\_B(R(\lambda), S_{LM}, dL_{eff})$   
(前述の数2の式と同じ)

以上のような計算からR\_FWHM、 $I_b$ 、 $S_{LM}$ といったパラメータの組合せを、前記数9の式を満足するように、例えば、前記計算例で言えば、 $(Cnd-1)$  R\_FWHM=0.2 nm、 $I_b = 1.2 I_{th}$ 、 $S_{LM} < 0.053$  nm、或いは、 $(Cnd-2)$  R\_FWHM=0.4 nm、 $I_b = 1.2 \times I_{th}$ 、 $S_{LM} < 0.084$  nm、或いは、 $(Cnd-3)$  R\_FWHM=0.2 nm、 $I_b = 1.4 \times I_{th}$ 、 $S_{LM} < 0.066$  nm、或いは、 $(Cnd-4)$  R\_FWHM=0.4 nm、 $I_b = 1.4 \times I_{th}$ 、 $S_{LM} < 0.105$  nm、或いは、 $(Cnd-5)$   $S_{LM} = 0.053$  nm、 $I_b = 1.2 \times I_{th}$ 、R\_FWHM>0.2 nm、或いは、 $(Cnd-6)$   $S_{LM} = 0.084$  nm、 $I_b = 1.2 \times I_{th}$ 、R\_FWHM>0.4 nm、或いは、 $(Cnd-7)$   $S_{LM} = 0.066$  nm、 $I_b = 1.4 \times I_{th}$ 、R\_FWHM>0.2 nm

或いは、 $(Cnd-8)$   $S_{LM} = 0.105$  nm、 $I_b = 1.4 \times I_{th}$ 、R\_FWHM>0.4 nm

といったように、設定することにより非線形利得飽和効果を利用して、モードホッピング状態に陥ることを回避でき、この結果、前記モードホッピング状態により発生する持続的な出力信号光の品質劣化を回避することができる。ここで、縦モード波長間隔 $S_{LM}$ は光共振器の実効長 $L_{ca}$ を調整することにより調整することができる。

【0069】更に、非線形利得飽和の効果の及ぶ波長幅が $\sim 3$  nm程度(前記参考文献10)であることから、例えば、光共振器を一往復する間の実効利得からBG光共振器鏡での損失を除いた値が3 dB程となっている場合、BG光共振器鏡での損失が3 dB以下となる帯域幅

反射スペクトルの半値全幅R\_FWHMがレーザー発振に関与する波長帯域を制限する前記BGの反射帯域幅R\_BWと一致し、R\_FWHM<3.0 nmとして、非線形利得飽和の効果の及ばない波長領域の縦モードの寄与を前記BGによる損失の効果により抑制することが必要である。

【0070】さらに、数9の式(前述の数2の式と同じ)を満足しつつ、同時に、レーザー発振に関与し競合する縦モードをBGの反射ピーク波長近傍の $2 \times n$ 個の縦モードに限定し、その他の縦モードの寄与をBGによる損失の効果により抑制することにより前記ECDLのレーザー発振波長の安定化を図る場合、BGの反射ピーク波長から" $n \times$ 縦モード波長間隔"分だけ発振モードが移動してしまった時点で、BGの反射ピーク波長に最も近い位置にある縦モードへ発振波長が切り替わるように、数10の式(前述の数3の式と同じ)を満足できるようにBGの反射スペクトル幅を設定すればよい。

【0071】

【数10】  $dLoss(\tau_{in}, S_{inI}, L_{ca}) < 10 \log_{10}(R(\lambda_p + n S_{LM})) - 10 \log_{10}(R(\lambda_p))$  (前記述の数3の式と同じ)

ここで、 $\lambda_p$ はBGの反射ピーク波長、 $n$ は1以上の整数であり、レーザー発振波長の安定化のためには $n=1$ または $n=2$ 程度とすることが望ましい。

【0072】例えば、図8に示す計算例において、 $I_b = 1.4 \times I_{th}$ 、且つ $S_{LM} = 0.066$  nmの時、数10の式の条件からR\_FWHM>0.2 nmが要求され、同時に、このとき許容損失逆転量 $dLoss \sim 0.277$  dBであるので、数11の式からR\_FWHM<0.435 nmが要求される。

【0073】

【数11】  $0.277 \text{ dB} < 10 \log_{10}(R(\lambda_p + n S_{LM})) - 10 \log_{10}(R(\lambda_p))$

総合すると、 $I_b = 1.4 \times I_{th}$ 、且つ $S_{LM} = 0.066$  nmの時、 $0.2 \text{ nm} < R\_FWHM \leq \sim 0.435 \text{ nm}$ という設計値が求められる。

【0074】また、ECDLの高速PCM\_Mの応用を考える場合、変調帯域を確保するためECDLの光共振器長は、短い方が光共振器内での光子寿命が短くなり有利となる。従って、要求される変調帯域にあわせてECDLの光共振器長をある決まった長さより短く設定する必要がある。

【0075】例えば、実効共振器長が6 mm程度のECDLで、3.5 GHz程度の変調帯域を有するものが報告されているので、(参考文献11: T.Takagi, et al., Proc. ECOC'98, pp81-82)、前記報告にあるECDLに用いられたSOAと同等の特性を有するSOAを用いてECDLを構成する場合、概算で、 $622 \text{ Mb/s NRZ}$ 変調では、実効共振器長 $L_{ca} < (2 \times 3.5 \text{ GHz}) / 622 \text{ Mb/s} \times 6 \text{ mm} \sim 68 \text{ mm}$ 未満、すなわち縦

モード波長幅換算で $S_{LM} \sim 0.018 \text{ nm}$ より大きく、 $2.5 \text{ Gb/s NRZ}$ 変調では、実効共振器長 $L_{ca} < (2 \times 3.5 \text{ GHz}) / 2.5 \text{ Gb/s} \times 6 \text{ mm} \sim 17 \text{ mm}$ 未満、すなわち縦モード波長幅換算で $S_{LM} \sim 0.071 \text{ nm}$ より大きくすることが求められる。

【0076】また、他の例として、SOAのチップ長 $0.2 \text{ mm}$ 、ファイバ型BG長 $8 \text{ mm}$ 、すなわち概算実効共振器長 $0.2 \times 3.5 + 8 \times 1.45 \sim 13 \text{ mm}$ のECDLで直接変調帯域 $7.5 \sim 8 \text{ GHz}$ を達成しているという報告もあり（参考文献12：F.N.Timofeev, et al., Electron Lett. vol. 35, No20, pp. 1737-1739, 1999）、この報告にあるSOAと同等の特性を有するSOAを用いてECDLを構成する場合、概算で、 $622 \text{ Mb/s NRZ}$ 変調では、実効共振器長 $L_{ca} < (2 \times 7.5 \text{ GHz}) / 622 \text{ Mb/s} \times 13 \text{ mm} \sim 313.5 \text{ mm}$ 未満、すなわち縦モード波長幅換算で $S_{LM} \sim 0.004 \text{ nm}$ より大きく、 $2.5 \text{ Gb/s NRZ}$ 変調では、実効共振器長 $L_{ca} < (2 \times 7.5 \text{ GHz}) / 2.5 \text{ Gb/s} \times 13 \text{ mm} \sim 78 \text{ mm}$ 未満、すなわち縦モード波長幅換算で $S_{LM} \sim 0.016 \text{ nm}$ より大きく $10 \text{ Gb/s NRZ}$ 変調では、実効共振器長 $L_{ca} < (2 \times 7.5 \text{ GHz}) / 10 \text{ Gb/s} \times 13 \text{ mm} \sim 19.5 \text{ mm}$ 未満、すなわち縦モード波長幅換算で $S_{LM} \sim 0.062 \text{ nm}$ より大きくすることが求められる。

【0077】さらに、光通信用光源として本発明のECDLを用いる場合、光線路からの後方レーリ散乱光、コネクタからの反射戻り光等が、本発明のECDLの光共振器内に戻ってきてしまい、これら反射戻り光が原因でレーザー発振状態が不安定となり、所望の特性が得られない状況に陥ることがある。

【0078】このような障害は、外部出力光の反射戻り光が前記ECDLの光共振器内に戻らないように、外部出力光を取り出すために用いる側の光共振器鏡M3（図9（a）の2-3、または図10（a）、（b）の3-2）、或いはM1（図9（b）の1-2、または図10（c）、（d）の1-2）と光外部出力ポート（図9（a）、（b）の8、または図10（a）、（b）、（c）、（d）の8）との間に光アイソレータ（図9（a）、（b）の7、または図10（a）、（b）、（c）、（d）の7）を配置することにより取り除くことができる。

【0079】前記ECDLのSOAの活性層の光導波方向に垂直な端面で、前記ECDLの光共振器鏡として用いる側の端面M1とは異なるもう一方の端面M2の反射が十分に抑圧されてない場合、端面M1と端面M2で形成される光共振器の縦モードと、前記ECDLの縦モードとが競合し、所望の特性が得られない状況に陥ることがある。

【0080】このような障害は、端面M2にARコート

する角度を $6 \sim 9$ 度傾けるか、或いは、その両方を施すかすることにより端面M2からの反射を十分に低減させることにより取り除くことができる。

【0081】光ファイバに形成されたBG、Si系平面基盤型光導波路に形成されたBGの反射ピーク波長の温度依存性は、通常 $0.01 \sim 0.02 \text{ nm/}^\circ\text{C}$ 程度（前記参考文献4、5）であることが報告されている。

【0082】動作温度範囲を $-5^\circ\text{C} \sim 45^\circ\text{C}$ の $50^\circ\text{C}$ の範囲と仮定すると、前記ECDLの発振波長の動作温度範囲における変動幅は、BGの波長変動幅 $0.02 \text{ nm/}^\circ\text{C} \times 50^\circ\text{C} = 1 \text{ nm}$ と、前記ECDLの縦モード間隔 $S_{LM}$ の和、程度に抑えられ、 $S_{LM} = 0.05 \text{ nm}$ 程度とBGの波長変動幅に比べて十分に小さい場合、BGの波長変動幅程度の $1 \text{ nm}$ にまで抑えられる。

【0083】光ファイバに形成されたBG、Si系平面基盤型光導波路に形成されたBGの反射ピーク波長の温度依存性は $\sim 0.001 \text{ nm/}^\circ\text{C}$ 程度（前記参考文献4、5）にまで温度無依存化されていることが報告されている。

【0084】このような温度無依存型のBGを用いた場合、動作温度範囲を $-5^\circ\text{C} \sim 45^\circ\text{C}$ の $50^\circ\text{C}$ の範囲と仮定すると、前記ECDLの発振波長の動作温度範囲における変動幅は、BGの波長変動幅 $0.001 \text{ nm/}^\circ\text{C} \times 50^\circ\text{C} = 0.05 \text{ nm}$ と、前記ECDLの縦モード間隔 $S_{LM}$ の和、程度に抑えられるので、 $S_{LM} = 0.05 \text{ nm}$ 程度とすると $0.1 \text{ nm}$ にまで抑えられる。

【0085】以上、本発明者によってなされた発明を、前記実施形態（実施例）に基づき具体的に説明したが、本発明は、前記実施形態（実施例）に限定されるものではなく、その要旨を逸脱しない範囲において種々変更可能であることは勿論である。

【0086】

【発明の効果】本願において開示される発明によって得られる効果を簡単に説明すれば、以下のとおりである。本発明によれば、温度調整機構を使用せずに、実用上要求される（ $50^\circ\text{C}$ 程度以上の）広い動作温度範囲での発振波長安定化と、出力信号光の温度変動により引き起こされる発振縦モードの跳びによる劣化の抑制との両方を実現可能なWDM光通信システム用無温調半導体レーザー装置を得ることができる。

【図面の簡単な説明】

【図1】本発明の無温調半導体レーザー装置の基本となるBGミラーを用いた実施形態1のECDLの構成を示す斜視図である。

【図2】本発明の無温調半導体レーザー装置の基本となるPLC型光導波路に形成させたBGを一方の光共振器鏡として用いる構成の実施形態2のECDLを示す斜視図である。

【図3】ECDLのレーザー発振開始当初を説明するための概念図である。

【図4】通常型ECDLの発振縦モードの切り替わりを説明するための概念図である。

【図5】通常型ECDLで隣接縦モードのBGにより被る損失が拮抗している状態を説明するための概念図である。

【図6】通常型ECDLで隣接縦モードのBGにより被る損失が拮抗しモードホッピングをしている状態を説明するための概念図である。

【図7】通常型ECDLで隣接縦モードのBGにより被る損失が拮抗してはいるものの、モードホッピングは起こしていない状態を説明するための概念図である。

【図8】 $Loss\_AMP\_B(R(\lambda), S\_LM, dL\_eff), \{a1, a2\}$  及び  $dLoss(\tau_{in}, S_{in\_l}, L\_ca), \{b1, b2\}$  の数値計算例を示す図である。

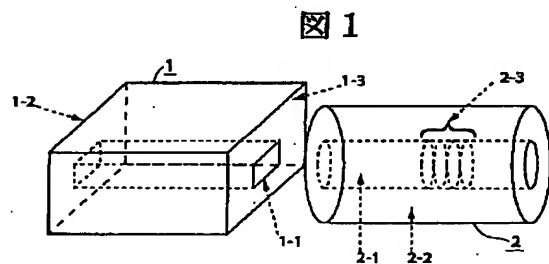
【図9】光ファイバ・ブラッグ・グレーティング(BG)を一方の光共振器鏡とした外部共振器型半導体レーザーで反射戻り光を取り除くため光アイソレータを配置した構成例を示す図である。

【図10】平面基盤型光導波路に形成したブラッグ・グレーティング(BG)を一方の光共振器鏡とした外部共振器型半導体レーザーで反射戻り光を取り除くため光アイソレータを配置した構成例を示す図である。

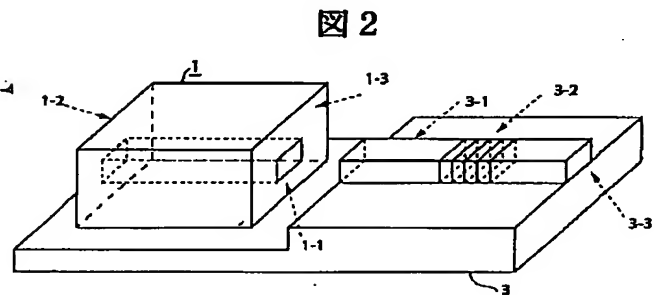
【符号の説明】

- |                                     |              |
|-------------------------------------|--------------|
| 1…SOA                               | 1-1…活性層光導波路部 |
| 1-2…端面M1                            | 1-3…端面M2     |
| 2…光ファイバ                             | 2-1…コア       |
| 2-2…クラッド                            | 2-3…BG形成部    |
| 2-4…外部光出力ポート                        | 3…PLC型光導波路   |
| 3-1…光導波路部                           | 3-2…BG形成部    |
| 3-3…外部光出力ポート                        |              |
| 4-1…BGの反射スペクトル(波長-損失特性)             |              |
| 5-1…縦モードLM1                         |              |
| 5-2…縦モードLM2                         |              |
| 5-1-H…ハイレベル信号光出力時の波長位置              |              |
| 5-2-H…ハイレベル信号光出力時の波長位置              |              |
| 5-1-L…ローレベル信号光出力時の波長位置              |              |
| 5-2-L…ローレベル信号光出力時の波長位置              |              |
| 5-1-W…波長位置の変動                       |              |
| 5-2-W…波長位置の変動                       |              |
| 6-1…発振縦モードと非発振縦モード間の損失逆転許容量 $dLoss$ |              |
| 6-2…発振縦モードと非発振縦モード間の損失逆転許容量 $dLoss$ |              |
| 7…光アイソレータ                           |              |
| 8…外部光出力ポート                          |              |

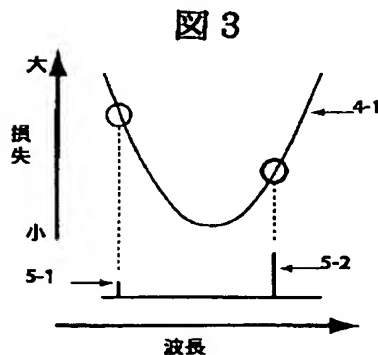
【図1】



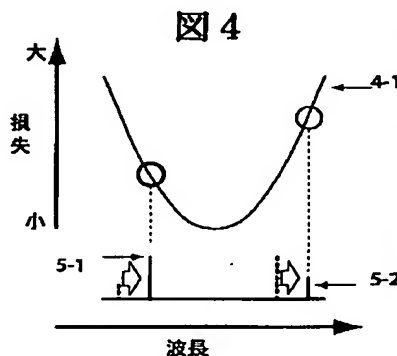
【図2】



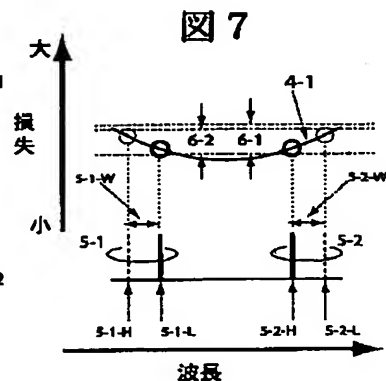
【図3】



【図4】

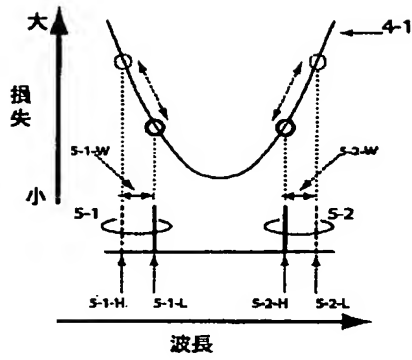


【図7】



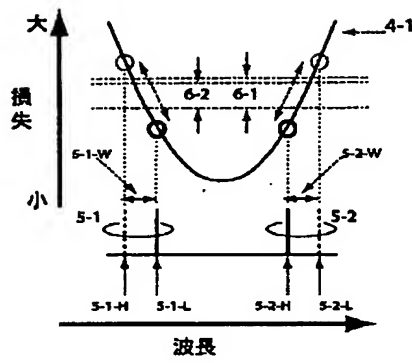
【図5】

図5



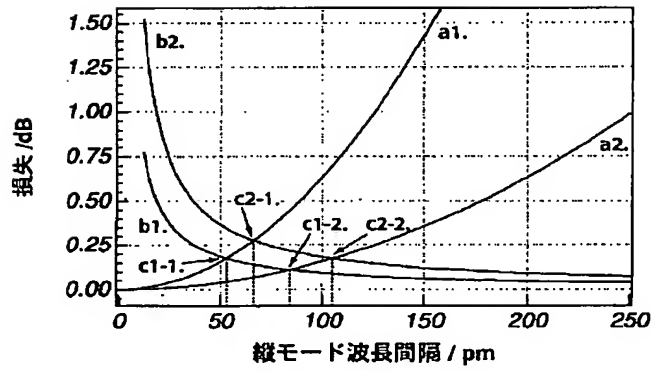
【図6】

図6



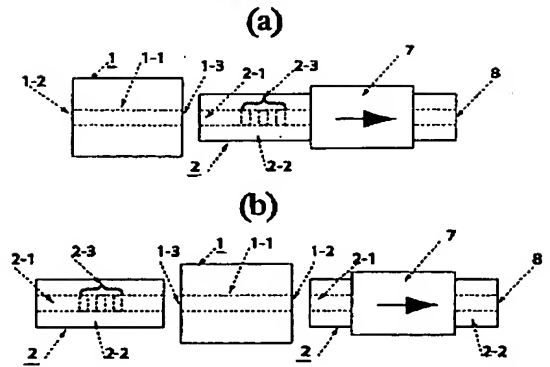
【図8】

図8



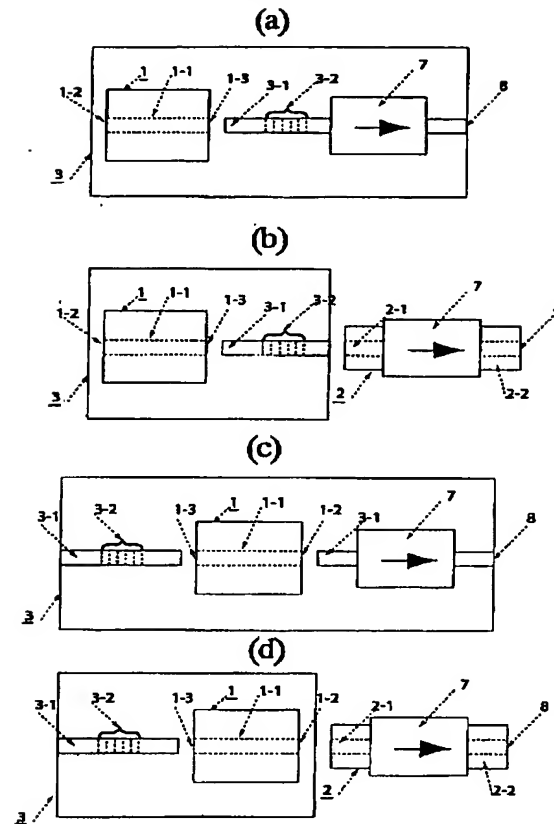
【図9】

図9



【図10】

図10



フロントページの続き

(72) 発明者 辻 幸嗣  
 東京都千代田区大手町二丁目3番1号 日  
 本電信電話株式会社内  
 (72) 発明者 武居 弘樹  
 東京都千代田区大手町二丁目3番1号 日  
 本電信電話株式会社内

(72) 発明者 堀口 常雄  
 東京都千代田区大手町二丁目3番1号 日  
 本電信電話株式会社内  
 Fターム(参考) 5F073 AA65 AA83 AB25 AB28 AB30  
 BA02 EA15 EA29